

2728

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего профессионального образования

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (МАМИ)

**Компьютерное моделирование процессов теплопередачи в
индукционных тигельных печах**

Методические указания по дисциплине «Печи литейных цехов» направления
150700.62 - «Машиностроение».

Маляров А.И., Солохненко В.В., Абрамова Е.И.



Москва
МГМУ (МАМИ)
2013

3

Методические указания составлены в соответствии с требованиями ФГОС ВПО и учебным планом по направлению 150700.62 «Машиностроение» для профиля подготовки «Машины и технологии литейного производства» на основе рабочей программы дисциплины «Печи литейных цехов».

Одобрено методической комиссией УГС 150000 – «Металлургия, Машиностроение и Материалообработка».

Рецензенты:

доцент кафедры «Кузовостроение и обработка металлов давлением» Университета машиностроения
к.т.н. Типалин С.А.

доцент кафедры «Технология конструкционных материалов
Университета машиностроения к.т.н. Черепухин А.А.

Работа подготовлена на кафедре «Машины и технология литейного производства»

Компьютерное моделирование процессов теплопередачи в индукционных тигельных печах: методические указания / А.И. Маляров, В.В. Солохненко, Е.И. Абрамова. – 1-е издание. – М.: Университет машиностроения, 2013.- 14 с.

В методических указаниях рассматривается методика моделирования процессов теплопередачи в индукционных тигельных печах с использованием программы T-Flex CAD (приложение «Тепловой анализ»). Приведён пример температурного поля и тепловых потоков печи ИСТ 006.

© А.И. Маляров, В.В. Солохненко, Е.И. Абрамова. 2013.
© МГМУ (МАМИ) 2013.

Введение

Индукционные тигельные печи (ИТП) являются самыми мощными потребителями электроэнергии в литейных цехах. Поэтому в условиях постоянно возрастающей стоимости энергоносителей повышение термического КПД печей является актуальной задачей.

В настоящее время существуют методики расчёта всех видов тепловых потерь при плавке в ИТП. К ним относятся: мощность потерь излучением со свободной поверхности металла в тигле, мощность потерь теплопроводностью через стенку и подину тигля, а также мощность потерь конвекцией с поверхности каркаса печи. Используемые в этих методиках формулы дают удовлетворительные результаты применительно к телам правильной формы. Элементы конструкции реальных печей имеют сложные поверхности, уклоны, фаски, отверстия и др. поэтому использование этих формул приводит к значительным погрешностям результатов.

Программы компьютерного моделирования, основанные на методе конечных элементов, учитывают действительную форму сложных элементов конструкции печи. Поэтому они дают значительно более точные результаты расчёта.

Целью работы является овладение навыками компьютерного моделирования процессов теплопередачи, позволяющими выбирать оптимальные режимы рабочих процессов промышленных печей и управлять этими процессами.

1. Объект моделирования

В качестве примера рассмотрим моделирование процесса теплопередачи в индукционной тигельной печи ИСТ006 на режиме термостатирования (выдержки чугуна перед разливкой при постоянной температуре 1450°C). Эта печь выбрана в качестве объекта моделирования потому, что за многие годы её эксплуатации в лаборатории кафедры МитЛП накоплен опыт, позволивший сформулировать исходные данные, начальные и краевые условия для расчёта, и оценить правильность полученных результатов.

В лабораторной работе «Изучение энергетического баланса плавки в печах серии ИСТ» по курсу «Металлургические процессы в литейном производстве» было установлено, что электрический КПД печи при плавке чугуна составляет 70...71%. Мощность, потребляемая печью от генератора на режиме термостатирования при 1450°C составляет 19 кВт. Поэтому тепловые потери на этом режиме составляют $19 \cdot 0,7 = 13,3 \text{ кВт}$. Эти потери являются суммой потерь тепла через стенку и подину печи теплопроводностью, излучением с зеркала металла и конвекцией с поверхности кожуха печи.

2. Методика вычислений мощности потерь тепла в индукционных тигельных печах.

2.1. Потери тепла через вертикальные стенки тигля.

Стенки тигля состоят из внутреннего огнеупорного слоя и наружного теплоизоляционного слоя из асбестового картона толщиной 5мм. Наружная поверхность теплоизоляционного слоя соприкасается с медным водоохлаждаемым индуктором. Мощность потерь через такую стенку определяется по формуле:

$$P_{\text{пот.ст.}} = \frac{2\pi \cdot H_m \cdot (t_m - t_u)}{1/\lambda_\phi \cdot \ln \frac{d_\phi}{d_{cp}} + 1/\lambda_{из} \cdot \ln \frac{D_u}{d_\phi}} \cdot 10^{-3} \text{ кВт} \quad \text{где:} \quad (8)$$

H_m - высота тигля, заполненная металлом, м;

t_m - температура металла, находящегося внутри тигля, °С;

t_u - температура индуктора °С;

d_{cp} - средний по высоте внутренний диаметр тигля, м;

d_ϕ - наружный диаметр тигля, м;

λ_ϕ - коэффициент теплопроводности футеровки, Вт/(м·°С);

$\lambda_{из}$ - коэффициент теплопроводности асбестового картона, Вт/(м·°С);

D_u - внутренний диаметр индуктора, м.

Мощность потерь через днище тигля по данным рассчитывают по формуле:

$$P_{\text{пот.дно}} = \frac{t_m - t_0}{\sum_{i=1}^n \frac{b_i}{\lambda_i S_i} + \frac{1}{\alpha_n S_n}} \text{ кВт} \quad \text{где:} \quad (9)$$

t_0 - температура воздуха в цехе;

λ_i - теплопроводность i -того слоя подины;

S_i - площадь поверхности i -того слоя подины;

S_n - площадь поверхности нижнего слоя подины.

В расчёте учитывают, что температура нижней поверхности подины не должна превышать 600К. Поэтому расчёт ведут методом последовательного приближения к этой температуре.

2.2. Потери излучением с зеркала металла в тигле.

Часть энергии, излучаемая с зеркала металла в свободное пространство лаборатории в соответствии с законом Стефана – Больцмана определяется по формуле:

$$P_{\text{пот.изл.}} = \varepsilon \cdot c_0 \cdot \left(\frac{T_m}{100}\right)^4 \cdot \frac{\pi \cdot d_m^2}{4} \cdot \xi \cdot 10^{-3} \text{ кВт}, \quad \text{где:} \quad (9)$$

ε - степень черноты расплава, для жидкого чугуна она примерно равна 0,29;

c_0 - коэффициент излучения абсолютно чёрного тела, равный 5,7;

T_m - температура металла, К;

d_m - диаметр верхней части тигля

ξ - коэффициент диафрагмирования, зависящий от уровня заполнения тигля.

Эта зависимость может быть представлена в виде:

$$\xi = 1 - \frac{0,25}{\left(\frac{d_m}{h_m - h_m}\right)^{0,5}} \text{ , где:} \quad (10)$$

h_m и h_m глубина тигля и металла соответственно.

Другая часть энергии, излучаемая зеркалом металла на стенки тигля, расположенные выше уровня металла, определяют исходя из закона Ламберта. Лучистый поток $d^2 Q_\beta$, посылаемый элементарной площадкой dF в телесный (пространственный) угол $d\omega$ *) , пропорционален величине этого угла и поверхности площадки $dF_{\text{вид.}}$, видимой в направлении оси $d\omega$ (рис.1).

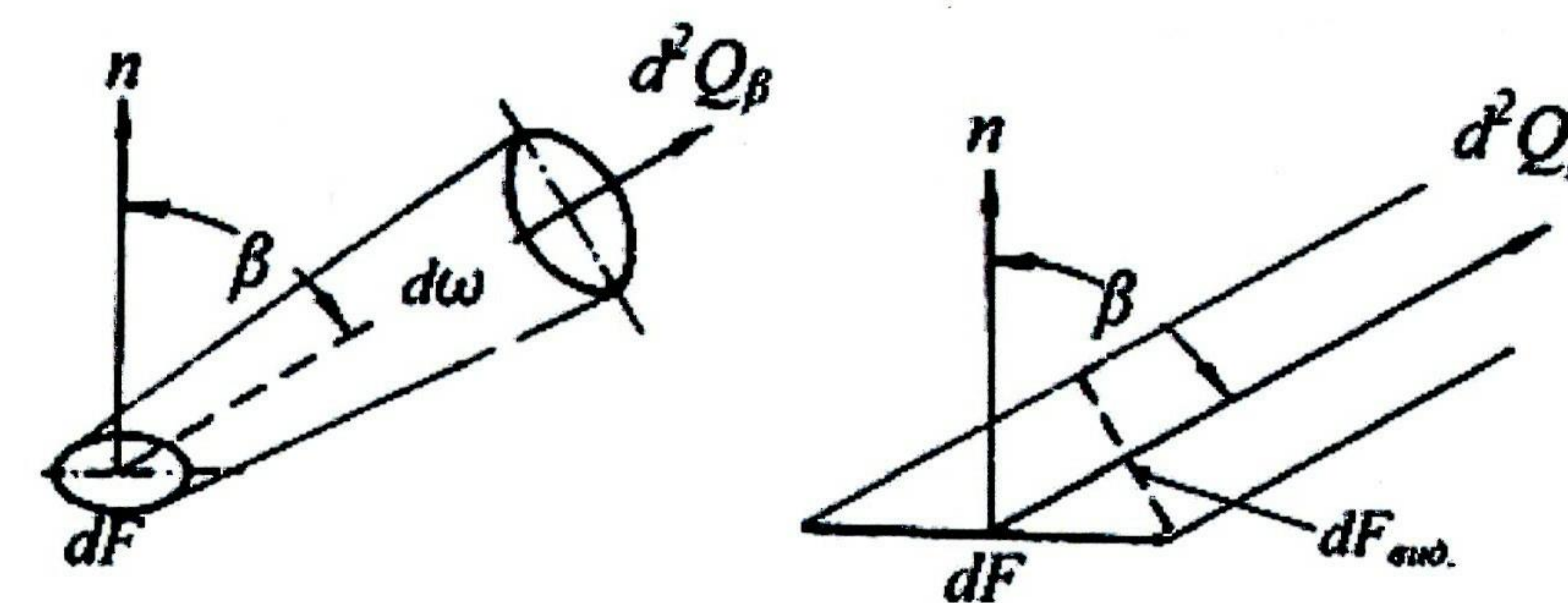


Рис.1. Иллюстрация к закону Ламберта

$$dQ_\beta = b_0 dF \cos \beta d\omega \text{ , Вт, где:} \quad (11)$$

*) - напомним что, стерadian равен телесному углу с вершиной в центре сферы радиусом r , вырезающему из сферы поверхность площадью r^2 .

Чтобы определить долю лучистого потока dQ_{1-2} , уходящего с поверхности F_1 и попадающего на поверхность F_2 (рис.2.), подставим в уравнение (11) выражение для телесного угла ω .

$$d\omega_1 = dF_2 \cos \beta_2 / l^2 \quad (12)$$

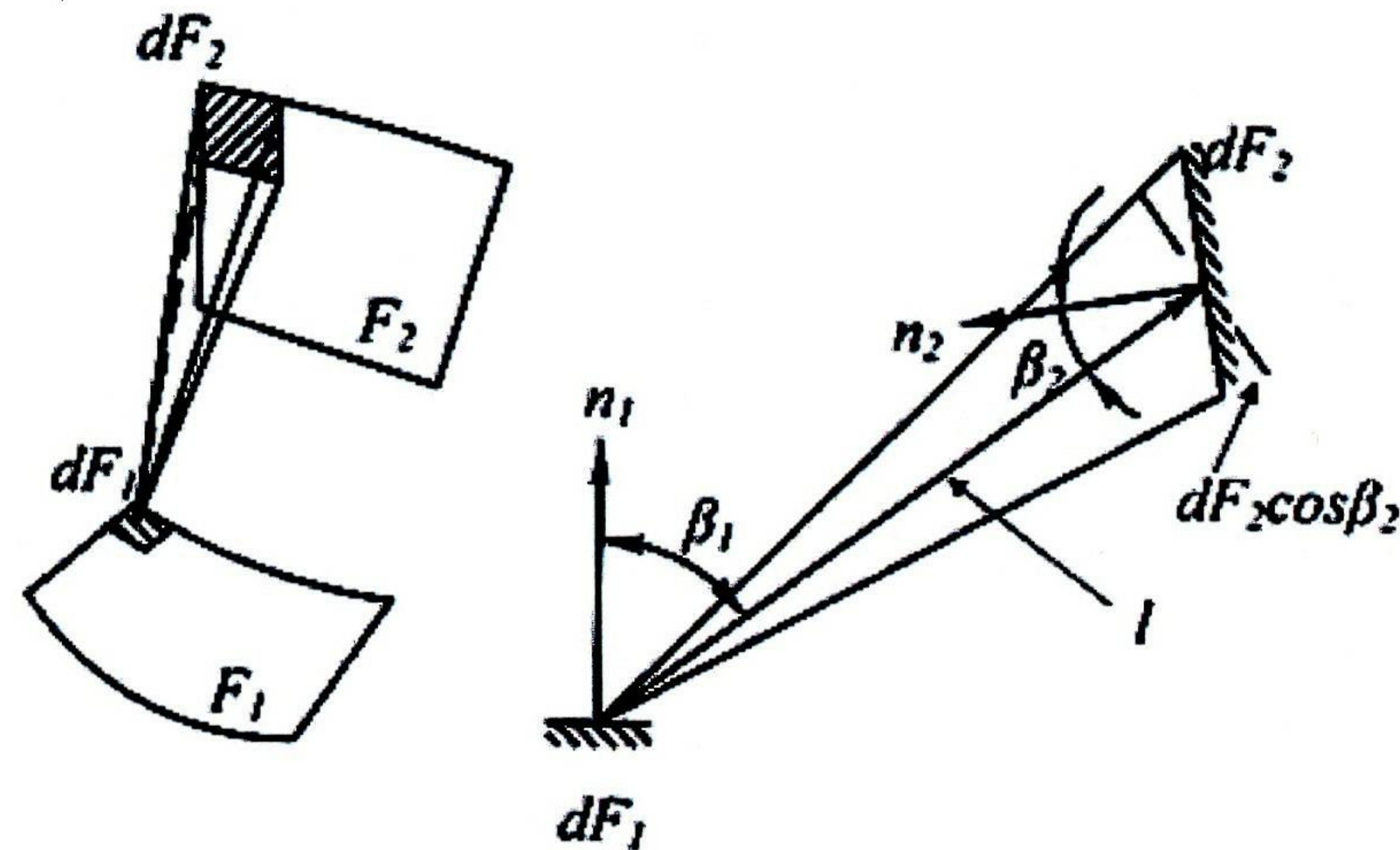


Рис. 2. Схема лучистого теплообмена между двумя произвольно расположенными поверхностями

Тогда:
$$dQ_{1-2} = \frac{b_{01}}{l^2} \cos \beta_1 \cos \beta_2 dF_1 dF_2 \quad (13)$$

Величина искомого потока определится интегрированием этого выражения (13) по поверхностям F_1 и F_2 :

$$Q_{1-2} = b_{01} \int_{F_1} \int_{F_2} \frac{1}{l^2} \cos \beta_1 \cos \beta_2 dF_1 dF_2, \text{ Вт} \quad (14)$$

Величину потока с поверхности F_2 на F_1 вычисляют по аналогичной формуле.

Аналитическое интегрирование уравнения (14) представляет большие трудности даже для простых по форме поверхностей. Метод конечных элементов, используемый для моделирования процессов теплопередачи в печи ИСТ006, позволяет вычислять значения интегралов для поверхностей практически любой сложности.

2.3. Потери тепла конвекцией с корпуса печи.

Передача теплоты конвекцией обусловлено тепловым движением частиц среды, поэтому интенсивность этого процесса зависит от характера движения и физических свойств среды.

Для расчёта теплового потока от твёрдого тела к жидкости или газу используют формулу:

$$Q_k = \alpha_k \cdot F \cdot (t - t_c), \text{ Вт, где:} \quad (15)$$

α_k – коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м²·К);

t – температура поверхности теплоотдачи, °С;

t_c – температура среды, °С;

F – площадь поверхности контакта двух сред, м².

Передачи тепла от наружной поверхности печи к окружающему воздуху происходит свободной конвекцией в неограниченном пространстве. Движение воздуха по поверхностям печи вызвано разной плотностью холодных и нагретых его частиц. Характер этого движения по разным частям поверхности печи схематично показан на рисунке 3.

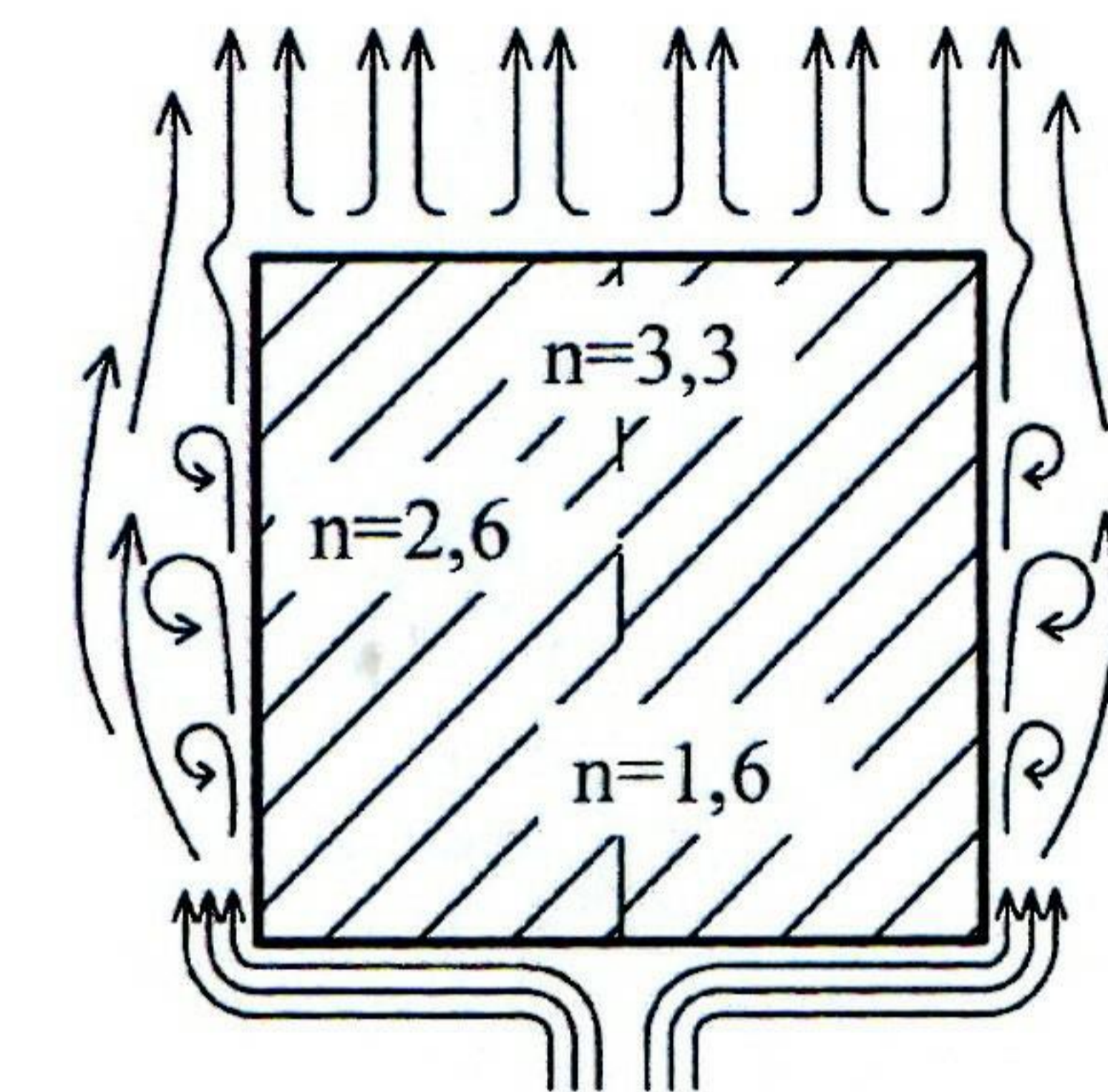


Рис. 3. Свободная конвекция с поверхностями печи

Движение воздуха вдоль днища печи носит ламинарный характер, струйки металла двигаются параллельно друг другу, не перемешиваясь между собой. Поэтому передача тепла от одного слоя к другому происходит путём диффузии частиц из горячих струй в более холодные. Этот процесс, как и все диффузионные процессы, характеризуется невысокой скоростью. В отличие от теплопроводности перемещения частиц в этом случае происходят на значительные расстояния.

Движение вдоль нижней части боковых поверхностей печи также носит ламинарный характер, но затем толщина ламинарного слоя уменьшается, движение становится турбулентным, вихреобразным. Очевидно, что скорость теплопередачи при этом резко возрастает.

Возможность перемещения холодного воздуха к своду печи и отвода от него нагретого значительно лучше, чем у днища. Поэтому передача со свода тепла происходит интенсивнее.

Во всех трёх случаях величину теплового потока определяют по формуле (15), а значения коэффициента теплоотдачи вычисляют по формуле:

$$\alpha_k = n \cdot \sqrt[4]{t - t_c}, \text{ где:} \quad (16)$$

n – коэффициент, зависящий от положения поверхности в пространстве. Для горизонтальной поверхности, обращённой вниз он равен - 1,6; для вертикальной поверхности - 2,6 и для горизонтальной поверхности, обращенной вверх - 3,3.

3. Последовательность разработки компьютерной модели процесса теплообмена в ИТП

Модель разработана в приложении «Тепловой анализ» программы T-FLEX CAD. Прежде всего, необходимо построить 3D модель печи (рис.4.). Элементы конструкции печи, не оказывающие существенного влияния на процессы теплопередачи, следует погасить для уменьшения количества вычислений, проводимых программой.

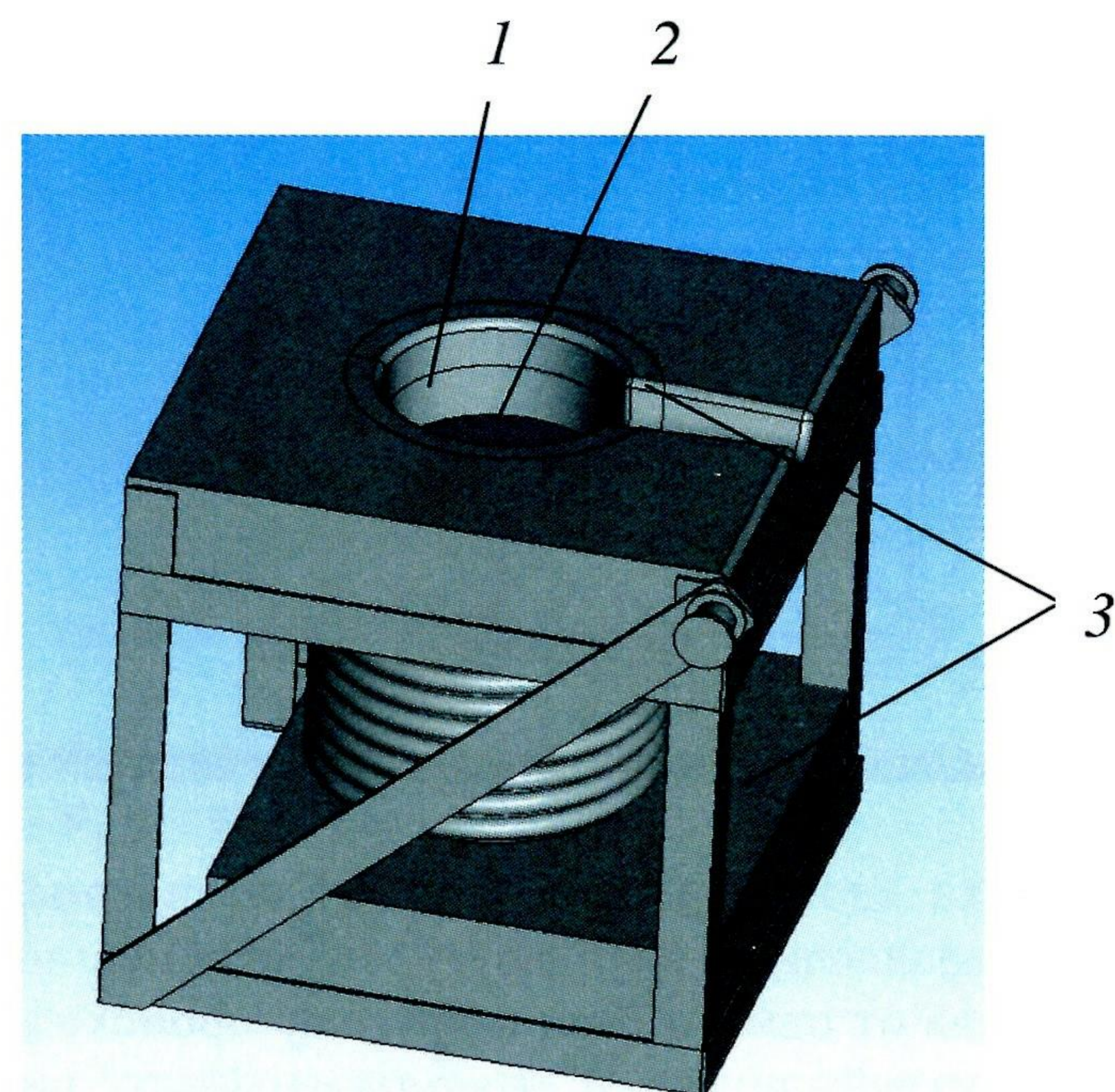


Рис. 4. Способы передачи тепла в индукционных тигельных печах
1- Теплопроводность через стенку печи, 2- излучение с зеркала металла, 3- теплопроводность и конвекция с подины печи и воротника печи.

Действие водоохлаждаемого индуктора учитывается краевым условием – температурой поверхности контакта индуктора с поверхностью теплоизоляции тигля. По данным экспериментальных плавов на моделируемом режиме она остаётся постоянной на уровне 300°C. Принятие этого краевого условия существенно сократило время расчётов по программе.

Все тела, составляющие модель, компьютерная программа разделяет на конечные элементы – тетраэдры. На рисунке 5. показана сетка конечных элементов, на которые разделены тела конструкции.

Сущность метода конечных элементов состоит в представлении о том, что передача тепла происходит между гранями конечных элементов. Способ теплопередачи расчётчик указывает в разделе «Нагрузки». Тела и поверхности, на которые назначаются нагрузки, отмечаются волнистыми линиями.

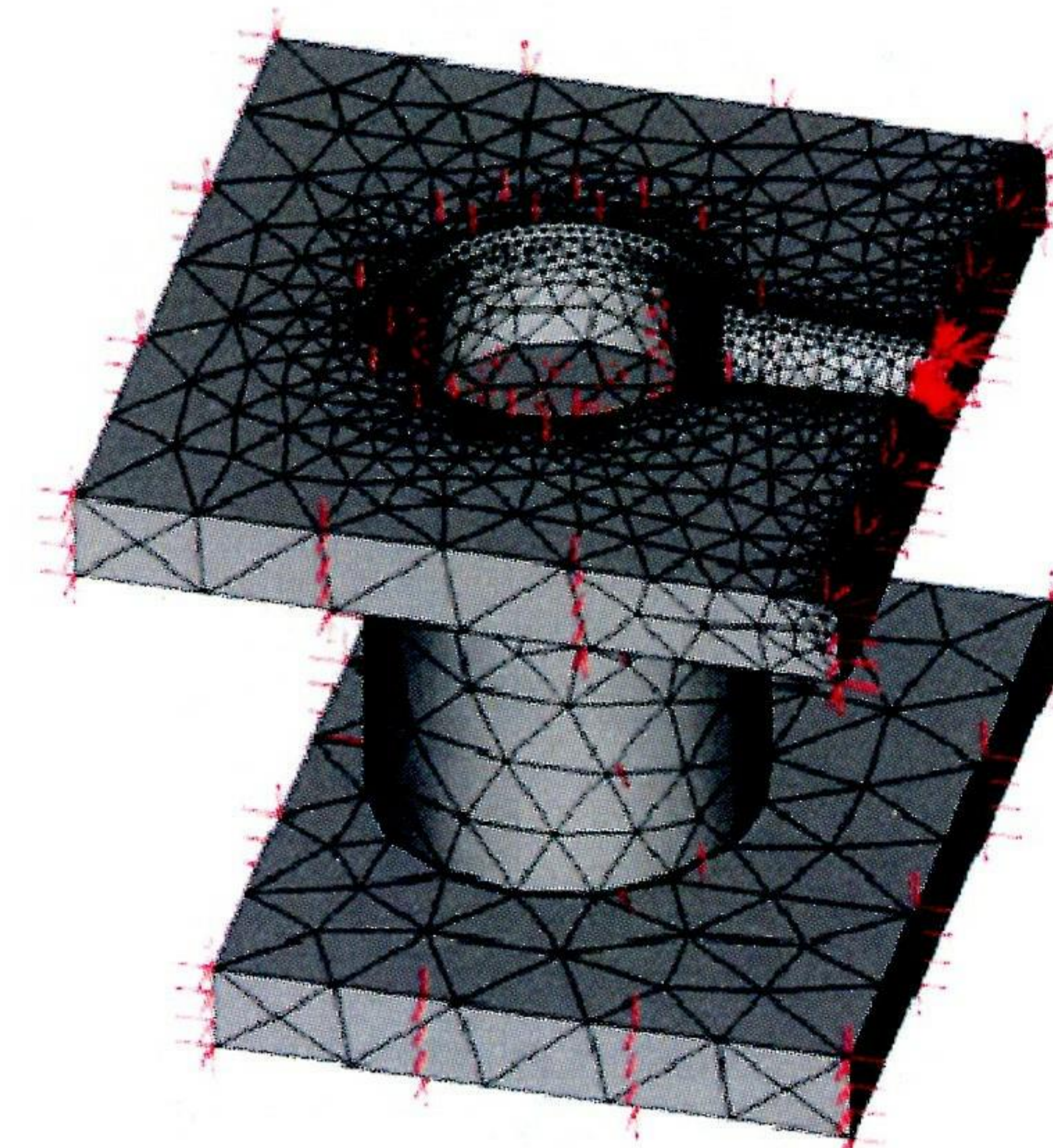


Рис. 5. Сетка конечных элементов и нагрузений

- В рассматриваемом примере заданы следующие виды нагрузений (рис.6.):
- **конвективный теплообмен_1** – конвекция с поверхности всех граней верхней и нижней плит;
 - **температура_3** - температура расплавленного металла (задана его начальная температура);
 - **температура_4** – температура поверхности теплоизоляционного слоя, соприкасающейся с индуктором (постоянная величина);
 - **тепловая мощность_2** - (мощность, передаваемая жидкому металлу);
 - **тепловое излучение_4** – излучение с поверхности металла в окружающую среду;
 - **тепловое излучение_5** - излучение с поверхности металла на «ВОРОТНИК»
 - **тепловое излучение_6** - излучение с поверхности металла на «Воротник верх».

При моделировании процесса методом подбора была определена такая тепловая мощность (мощность, передаваемая индукцией жидкому металлу), при которой температура металла в конце установившегося режима не отличалась от начальной (1723 К). Эта мощность равна суммарной мощности тепловых потерь на заданном режиме. Методом подбора было установлено (рис. 7.), что такой режим работы печи с кислой футеровкой (режим термостатирования) обеспечивается при тепловой мощности равной 13 400Вт.

При использовании магнезиальной футеровки суммарная мощность тепловых потерь увеличилась до 17 250Вт (рис. 8.). Это объясняется тем, что

удельная теплопроводность магнезиальной футеровки в рабочем диапазоне температур в 2 раза выше, чем кварцевой.

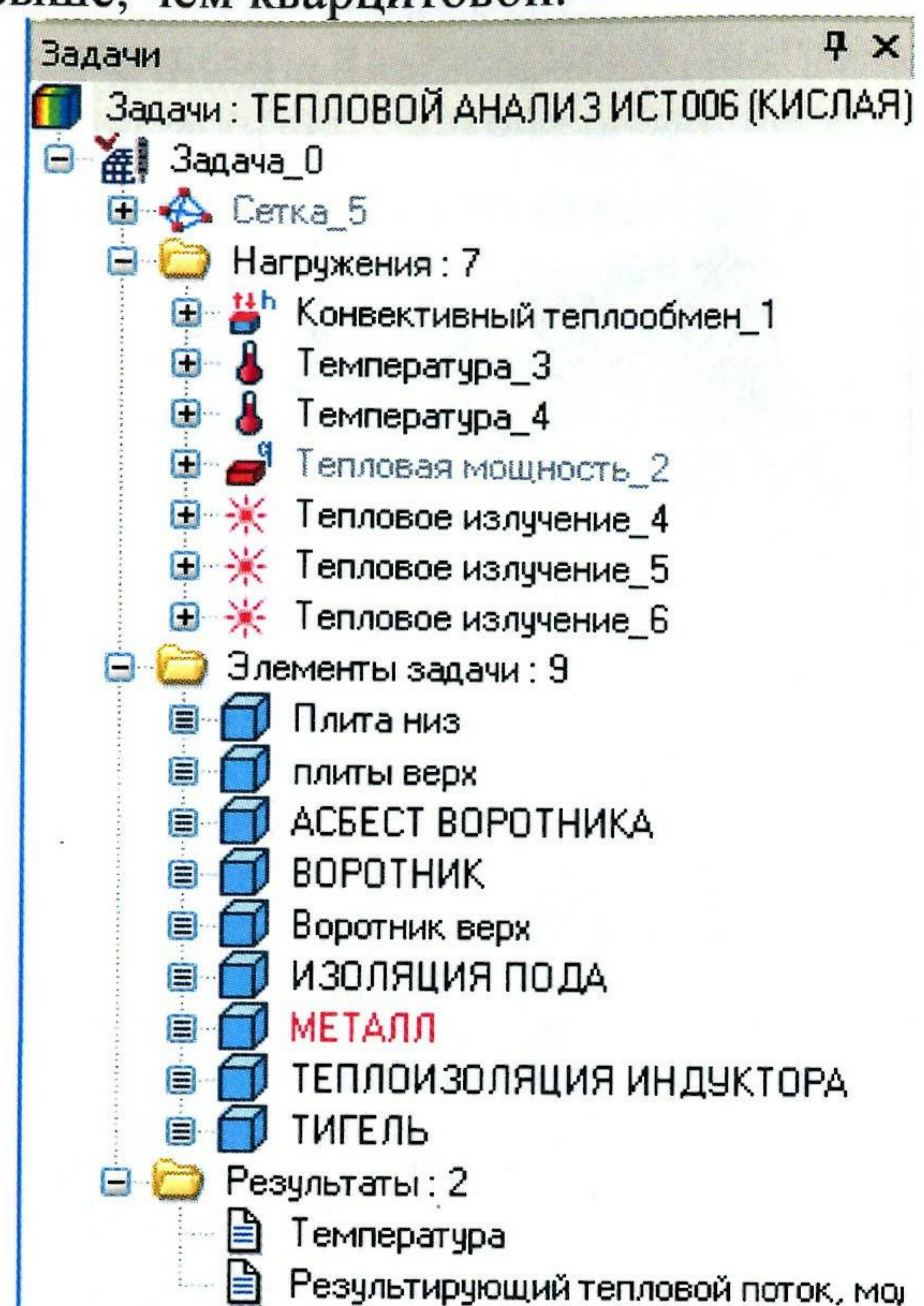


Рис. 6. Вид окна «Задачи» программы «Тепловой анализ»

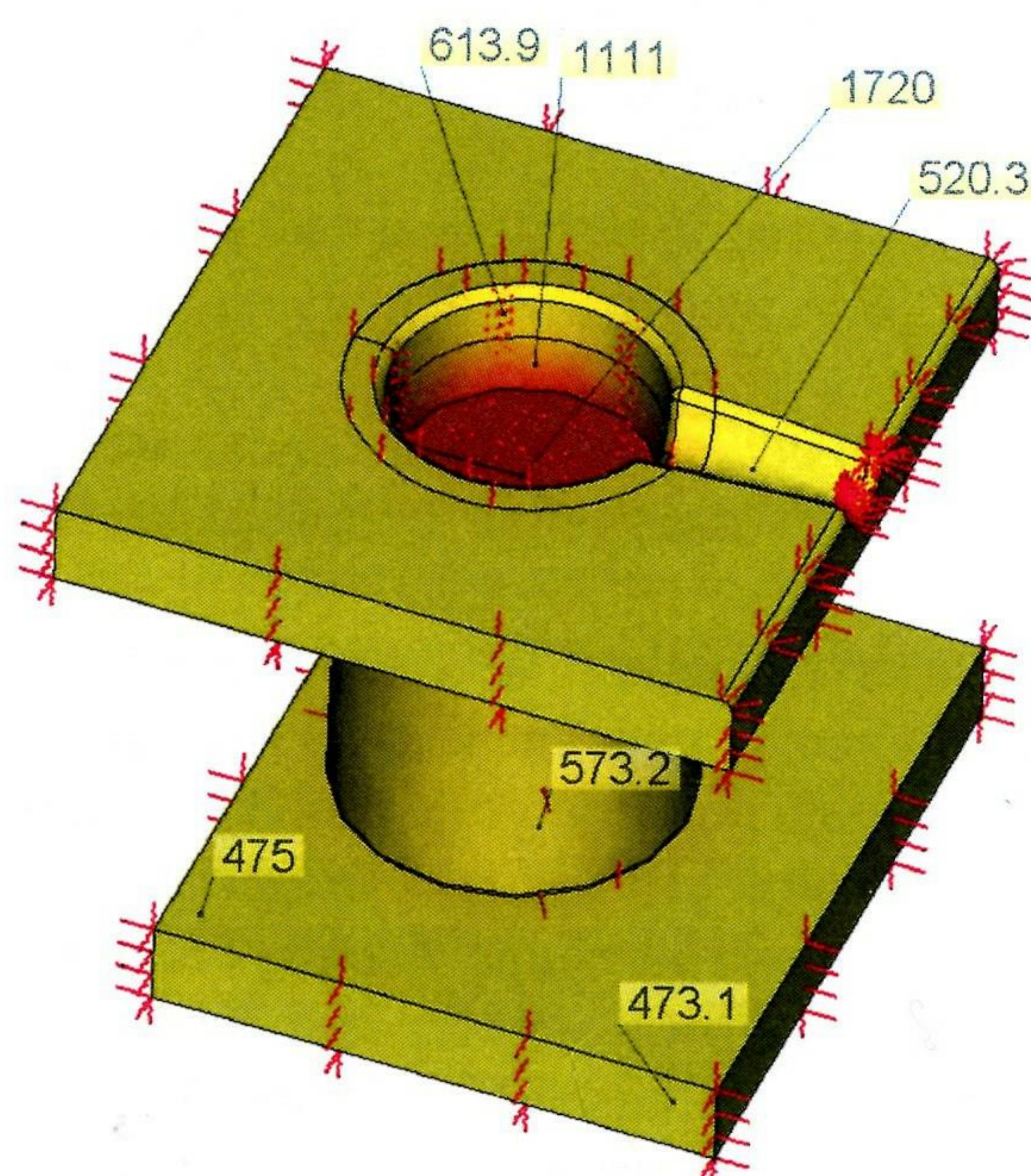


Рис. 7. Температурное поле печи с кислой футеровкой на установившемся режиме при мощности 13 400Вт. (значения температур приведены в Кельвинах)

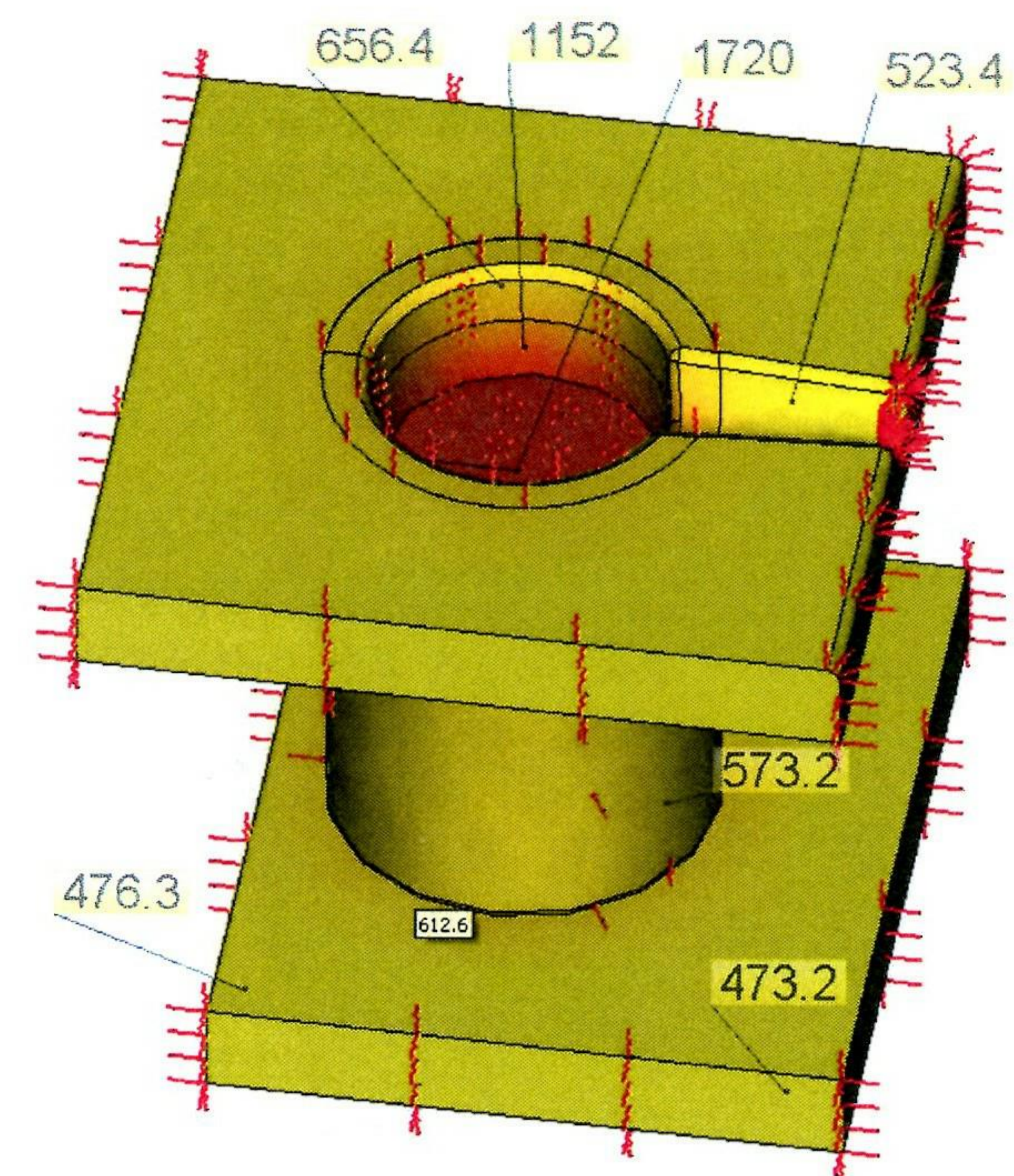


Рис. 8. Температурное поле печи с основной футеровкой на установившемся режиме при мощности 17 250Вт

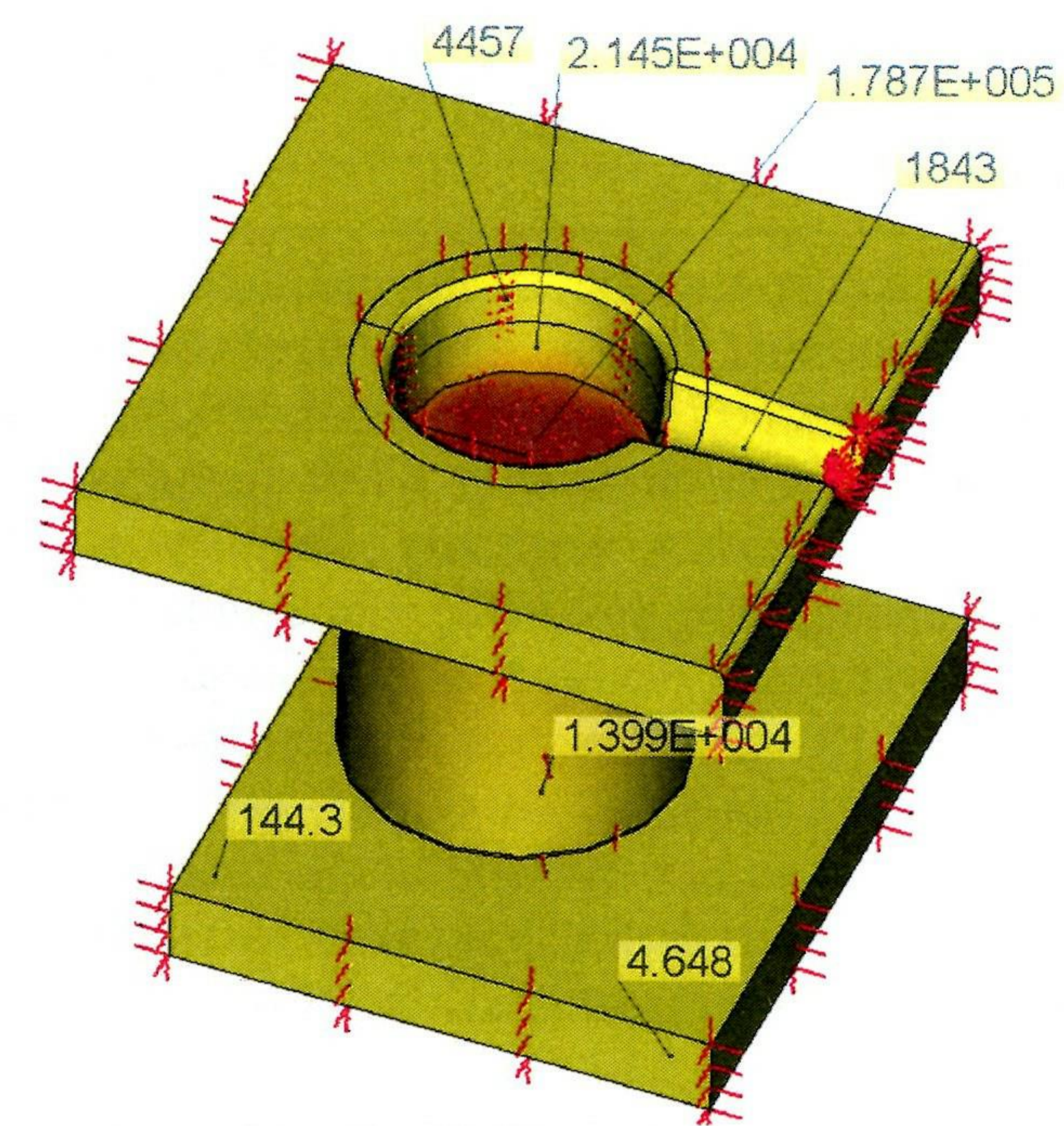


Рис. 9. Поле удельных тепловых потоков на поверхности печи с кислой футеровкой, кВт/м²

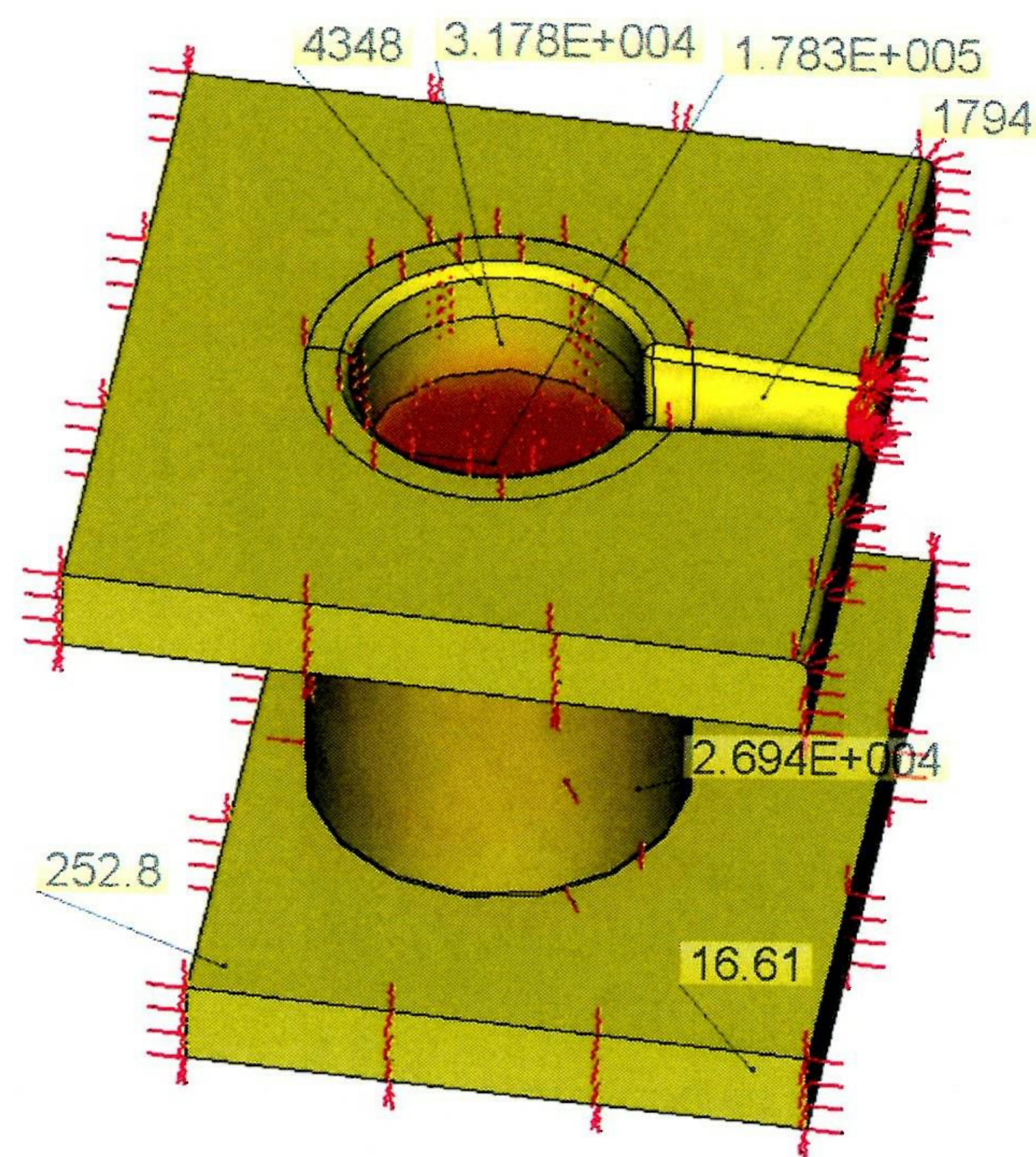


Рис. 10. Поле тепловых потоков на поверхности печи с основной футеровкой, кВт/м²

Многочисленные эксперименты, проводившиеся на печи ИСТ 006 в лаборатории кафедры «Машины и технология литейного производства» МАМИ показали, что мощность, потребляемая печью с кислой футеровкой на этом режиме составляет 20кВт. Электрический КПД печи по расчёту равен 70%. Поэтому мощность, передаваемая жидкому металлу и расходуемая на все тепловые потери, составляет 14кВт. Это достаточно хорошо согласуется с мощностью тепловых потерь полученной моделированием - 13,4кВт.

На рисунках 9. и 10. приведено распределение суммарных тепловых потоков по поверхности печей с кислой и с основной футеровкой соответственно. Из рисунков видно, что удельный тепловой поток с поверхности тигля на индуктор при основной футеровке значительно выше чем при кислой и составляет 26,94 и 13,99 соответственно кВт/м².

4. Вопросы для самопроверки.

- перечислите способы передачи тепла в различных частях конструкции печи;
- как зависят от температуры удельные потоки тепловой энергии, передаваемые этими способами?
- в чём состоит суть метода конечных элементов применительно к тепловому анализу?

- почему в качестве объекта моделирования выбрана печь ИСТ006?
- для какого режима работы печи проводится сравнение экспериментальных данных с результатами моделирования?

5. Порядок выполнения работы

- изучить содержание методических указаний;
- пройти входной контроль в форме собеседования с преподавателем;
- получить индивидуальное задание для моделирования;
- по справочной литературе и Интернету определить теплофизические свойства металла, огнеупорных и теплоизоляционных материалов;
- внести изменения в программу моделирования и определить методом подбора «Тепловую мощность» соответствующую режиму термостатирования;
- провести сравнительный анализ полученных результатов с результатами рассмотренного в методических указаниях примера моделирования;
- обсудить результаты моделирования с преподавателем.

6. Примерный перечень индивидуальных заданий

Провести моделирование процессов теплопередачи в ИСТ006 при плавке сплава, указанного в предложенном варианте задания.

№ варианта	Марка сплава	№ варианта	Марка сплава
1	ЦАМ	7	Сталь 35Л
2	АК12М2	8	Сталь нержавеющая
3	Латунь	9	СЧ10
4	Бронза	10	СЧ25
5	Бронза колокольная	11	КЧ35-10
6	Мельхиор	12	ИХЧ

Список литературы.

1. Долотов Г.П., Кондаков Е.А. Печи и сушила литейного производства. – М.: Машиностроение, 1990. – 303 с.
2. Теплотехника металлургического производства: Т.1: Теоретические основы: Учебник / Под ред. В. А. Кривандина.-М.: МИСИС,2002.-608 с.
3. Теплотехника металлургического производства: Т.2: Конструкция и работа печей: Учебник / Под ред. В. А. Кривандина.-М.: МИСИС,2002.-734 с.
4. Трухов А.П., Маляров А.И. Литейные сплавы и плавка. - М.: «АКАДЕМИЯ», 2004. - 335 с.
5. Маляров А.И. Технология плавки литейных сплавов: Учебное пособие для студентов высших учебных заведений - М.:Полиграф сервис, 2005.-196 с.

Учебное издание

Маляров Аркадий Ильич
Солохненко Василий Васильевич
Абрамова Елена Игоревна

**Компьютерное моделирование процессов теплопередачи в
индукционных тигельных печах**

Под редакцией авторов

Подписано в печать 28.01.2013.

Формат бум. 60x84 1/16.

Гарнитура «Таймс». Объем усл. печ. л. 14. Тираж 3 экз. Заказ № ___ - ___

Редакционно-издательский отдел МГМУ (МАМИ)

107023, г. Москва, Б. Семёновская ул., 38